



# לא להשאלה

אמינות ויעילות בתפעול מערכת אספקת מים  
עם התאמה לצריכות אקראיות

תמר שור

הספריה המרכזית ע"ש אלישר  
מס' 2255950 מערכת

## תקציר

במהלך תכנון תפעול מערכת אספקת מים קיימת שאלת הבחירה בין הורדת מפלסי הסף המינימליים בבריכות, ועל-ידי כך הגדלת האיגום והרווח התפעולי, לבין העלתם, המגדילה את האוגר הרזרבי, ועל-ידי כך העלאת רמת האמינות של המערכת.

מטרת העבודה היא להציג תכנית המאפשרת מתן תמונה ברורה של המשמעות הכספית של העלאת רמת אמינות המערכת, בצד כלי יישומי לתפעול אופטימלי של המערכת בזמן אמת, עם צריכות אקראיות. התכנית מהווה, למעשה, כלי בידי מתכנן התפעול.

בחינת אופטימליות המערכת בהיבטים של עלות התפעול ואמינות האספקה ממומשת באמצעות שני מודולים: מודול האופטימיזציה ומודול בדיקת האמינות. הראשון מבצע אופטימיזציה של התפעול בהינתן האוגר התפעולי, מעל מפלס סף מוכתב במאגר, שמתחתיו יש אוגר רזרבי בגודל מסוים. פלט המודול כולל תכנית הפעלת משאבות, מפלסי יעד מתוכננים וחישוב החסכון המושג משימוש באוגר התפעולי הנתון. שיטת האופטימיזציה בה נעשה שימוש היא תכנות ליניארי. המודול השני מנתח את אמינות המערכת. בניתוח האמינות נעשה שימוש בשני מושגים: "תקלה" - רכיבים אינום פועלים, "כשל" - למערכת אינה מספקת שירות כנדרש, במקרה זה - אי-אספקה מלאה של הכמות הנדרשת. במודול מתבצע חישוב הכשלים הנגרמים כאשר מתרחשות תקלות של משאבות והאוגר הרזרבי משמש כאוגר תפעולי. מדדי הכשלים הם מספר שעות אי האספקה והכמות הנדרשת שלא סופקה. בעבודה לא נעשה חישוב הסתברותי להיווצרות התקלות, אלא מתן תשובה לשאלה כגון: "מה יקרה אם משאבה אחת תתקלקל?"

הרצת מודולים אלו מספר פעמים עם אוגר תפעולי משתנה יוצרת פונקציה של שני משתנים: עלות התפעול לעומת אמינות האספקה. ניתוח הפונקציה מסייע למתכנן לבחור את מפלסי הסף הרצויים.

הרחבת התכנית לזמן אמת מתאפשרת באמצעות שימוש במודול הבקרה. מודול הבקרה הוא כלי לשימוש בתכנית האופטימיזציה בזמן אמת, המגיבה על צריכה בפועל השונה מהצריכה המתוכננת עקב שינויים אקראיים. מודול זה מורץ לאחר שנבחרו מפלסי הסף הרצויים למערכת.

שימוש בשלושת המודולים מסייע בקבלת החלטות על גודל האוגר התפעולי וקביעת ערך האוגר המינימלי הנדרש, ועל תפעול המערכת תוך עמידה באילוצים משתנים.

עבודה זו מממשת את תכנית האופטימיזציה, ומציגה את תוצאות ההפעלה על בסיס נתונים תיאורטי, המייצג מערכת אספקת מים אזורית המורכבת מצרכן, מקור ואיגום אגרטיביים.

**Reliability and Efficiency  
In Operating a Water Supply System  
With Adjustment to Random Demands**

Research Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of The  
Requirements for the Degree of  
Master of Science in Engineering and Management of Water Resources

Tamar Shor

Submitted to the Senate of  
the Technion - Israel Institute of Technology

Iyar, 5763

HAIFA

May 2003

## **Abstract**

### **Introduction**

High quality of service and low costs are the main objectives of operating a water supply system.

The quality of service is measured in this work by the ability of the system to supply the required amount of water at sufficient pressure at any time. The probability that the quality of service will be maintained defines the reliability of the system. In order to increase the system's reliability, there is a need to preserve emergency storage in the reservoirs, which will compensate for loss of pumping capability in case of a failure.

Low cost is achieved by decreasing the cost of electricity consumed by the pumping stations. Using the reservoirs as buffers to shift the pumping from high electricity tariff hours to low ones is one of the most efficient methods to achieve this goal. The more storage is available for performing this shift, the more money can be saved. There is a competition between the above mentioned objectives: on the one hand, high water levels increase the reliability, on the other hand, electricity costs are lowered by emptying the reservoirs at high electricity tariff hours.

This study presents a method to help optimizing the trade-off between high reliability and low costs. A model using a combination of an optimization program and a reliability assessment program is developed to show the implications of deciding upon the operational storage in the reservoirs. An automatic control program is developed to simulate the implementation of the optimization program as a real-time operation tool, handling random demands.

### **The optimization program**

The optimization program, based on linear programming, determines a least-cost schedule of pumping based upon predicted demands in a given planning period. The model is based on the following assumptions:

The whole water distribution system acts as one pressure zone, where water can be supplied from any reservoir in the system to each demand node. This allows summing all the reservoirs to one.

A program that forecasts future hourly water demand is available for the system.

The pumping rate and the specific energy demand of the pumps are close to their nominal values, and are not influenced by pressure fluctuations in the system.

Electricity tariffs are identical at all pumping stations; there are three tariff levels at different periods of the day.

Prior to running the program, the user defines a preferred value of operational storage allowed in the reservoirs. Using this given value as a constraint on the minimum level, the program calculates the pump scheduling, the operational costs and the forecasted levels in the reservoirs at the beginning of each hour.

The optimization outputs for a theoretical system are demonstrated in figures 2-8 for different values of operational storage.

Figure 9 depicts the results in a graph of costs vs. operational storage.

### **The reliability assessment program**

A failure event is defined in this study as a situation in which the system fails to supply the needed amount of water to the consumers.

A fault event is a problem in one or more of the pumping units, which causes loss of pumping capacity in the system.

The reliability assessment program scans the planning period to find whether a fault event at any hour causes a failure in the system, based on the predefined value of operational storage allowed in the reservoirs.

The inputs to this program are the full and residual pumping capacity, the duration of the fault event, the storage in the reservoir at the beginning of the event, taken from the optimization program output, and the forecasted hourly demands.

The algorithm is based on the assumption that once a fault event happens, the system switches to emergency mode. In such cases, all the residual pumping capacity is used to try to prevent failure of the system, i.e. shortage of supply.

The outputs of the program are the failure events for the given operational (minimal) storage and the loss of pumping capacity, in terms of "failure duration" and "amount of shortage during the failure", for every hour in the planning period.

The trade-off between operational costs and reliability for different values of the operational storage is demonstrated in figures 14 and 15.

### **The automatic control program**

Modern water supply systems are operated remotely by control centers. In the control center the system is monitored, data are gathered and archived, demand forecast programs are operated and real-time operation programs are implemented, by sending operational commands to pumping units and electric valves.

Control program use reservoir levels as the triggering mechanism for turning pumps on and off: when the level drops below an "operate" level the pump is turned on, and when it rises above a "shut-down" level the pump is turned off. In conventional control systems these levels are hard-wired and remain fixed. In more advanced modern system, these levels are set in software, which can modify the "on" and "off" levels depending on various conditions that evolve with time.

The optimization program serves as a guideline for setting the on-off levels in the control program. The optimization is based on a deterministic model, is generated in advance and cannot react to unpredicted fluctuations in the demand. The control program must handle stochastic demands to adjust the operation and to prevent overflowing or emptying the reservoirs.

The success of the combined optimization and online control programs depends on the following:

Accurate water meters and level meters that are installed in the pumping units and the reservoirs, respectively.

Stable, error free bidirectional communication between the control center computers and the end units.

Historical database, which preserves hourly water demands, water levels and flow information is needed for demand forecasting and post factum operation assessment.

The human factor is crucial in successful implementation of such programs. Lack of confidence in the program's instructions may result in manual interference with the automatic operation, or reduction of the operational storage, in order to maintain a confidence level.

The initial state for the control program is the level generated by the optimization program. Once there is a change from the conditions assumed in computing the optimal operation plan, the reservoir level will deviate from the planned value. As long as the deviation between the planned water levels and the actual ones is below a certain threshold, the optimization program results can continue to serve as the control program. Otherwise, the control program has to activate or deactivate pumps, in order to move towards the planned water level.

The model introduced in this thesis is designed as a simulation program. The actual hourly demands are randomized around the nominal values, and made higher than the estimated demand, on the average by 20%.

The simulation is run for 48 hours. It uses the results of the optimization program, for an operational storage of 450 m<sup>3</sup>. Figure 16 presents the control interface of the program and Figure 17 contains the hourly results of the simulation.